

## 则木河断裂带（普格段）地质灾害发育规律及易发性评价

李光辉, 铁永波, 白永建, 熊晓辉

### Distribution and susceptibility assessment of geological hazards in Zemuhe fault zone (Puge section)

LI Guanghui, TIE Yongbo, BAI Yongjian, and XIONG Xiaohui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-14>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 北京山区突发性地质灾害易发性评价

Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing

罗守敬, 王珊珊, 付德荃 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 126-133

#### 基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126

#### 基于GIS和信息量模型的安徽池州地质灾害易发性评价

王雷, 吴君平, 赵冰雪, 姚志强, 张乐勤 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(3): 96-102

王雷, 吴君平, 赵冰雪, 姚志强, 张乐勤 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(3): 96-102

#### 香丽高速公路边坡地质灾害发育特征与易发性区划

Development characteristics and susceptibility zoning of slope geological hazards in Xiangli expressway

廖小平, 徐风光, 蔡旭东, 周文皎, 魏家旭 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 121-129

#### 基于快速聚类-信息量模型的汶川及周边两县滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China

周天伦, 曾超, 范晨, 毕鸿基, 龚恩慧, 刘晓 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 137-150

#### 黄河流域甘肃段地质灾害发育特征

The development characteristics of geological hazards in Gansu segment of the Yellow River basin

郭富, 宋晓玲, 刘明霞 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 130-136



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-14

李光辉, 铁永波, 白永建, 等. 则木河断裂带(普格段)地质灾害发育规律及易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 123-133.

LI Guanghui, TIE Yongbo, BAI Yongjian, *et al.* Distribution and susceptibility assessment of geological hazards in Zemuhe fault zone (Puge section)[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 123-133.

## 则木河断裂带(普格段)地质灾害发育规律及 易发性评价

李光辉<sup>1</sup>, 铁永波<sup>1,2</sup>, 白永建<sup>2</sup>, 熊晓辉<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

**摘要:**以则木河断裂带(普格段)为研究区, 分析研究区的地质灾害控制效应以及发育规律; 选取海拔高程、坡向、坡度等 7 个评价因子构建评价指标体系, 运用确定性系数模型与信息量模型耦合的加权信息量模型, 通过 ArcGIS 进行地质灾害易发性评价。结果显示, 研究区地质灾害发育具有断层距离效应、地层效应以及高程和坡度微地貌效应; 极高易发区、高易发区、中易发区和低易发区的面积分别为 46.75 km<sup>2</sup>、123.78 km<sup>2</sup>、215.73 km<sup>2</sup>、285.34 km<sup>2</sup>, 面积占比分别为 6.96%、18.43%、32.12%、42.49%。研究结果对指导则木河断裂带地区以及同类区域的国土空间规划与地灾防治等方面具有重要现实意义。

**关键词:** 地质灾害; 加权信息量模型; 易发性评价; 则木河断裂带

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)03-0123-11

## Distribution and susceptibility assessment of geological hazards in Zemuhe fault zone (Puge section)

LI Guanghui<sup>1</sup>, TIE Yongbo<sup>1,2</sup>, BAI Yongjian<sup>2</sup>, XIONG Xiaohui<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences (Wuhan) Institute of Geophysics & Geomatics, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Chengdu Geological Survey Center, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China)

**Abstract:** Taking Zemuhe fault zone (Puge section) as the study area, the control effect and development law of geological disasters in the study area are analyzed; Seven evaluation factors such as elevation, aspect and slope from fault are selected to construct the evaluation index system. The weighted information model coupled with deterministic coefficient model and information model is used to evaluate the susceptibility of geological disasters through ArcGIS. The results show that the development of geological hazards in the study area has fault distance effect, elevation and slope micro geomorphic effect and stratigraphic effect; The areas of extremely high, high, medium and low prone areas are 46.75 km<sup>2</sup>, 123.78 km<sup>2</sup>, 215.73 km<sup>2</sup> and 285.34 km<sup>2</sup> respectively, accounting for 6.96%, 18.43%, 32.12% and 42.49% respectively. The research results have important practical significance for guiding the land spatial planning and geological disaster prevention in Zemuhe fault zone and similar regions.

**Keywords:** geological hazards; weighted information model; susceptibility assessment; Zemuhe fault zone

收稿日期: 2022-02-23; 修订日期: 2022-04-29

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221746); 国家自然科学基金项目(U20A20110-01)

第一作者: 李光辉(1998-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害风险评价。E-mail: 981736950@qq.com

通讯作者: 铁永波(1979-), 男, 云南昭通人, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事地质灾害评价与防治研究。

E-mail: tyb2009@qq.com

## 0 引言

则木河断裂带位于我国青藏高原的东南边界川滇地块上,构造位置特殊,断裂活动与地表形变作用强烈。因此,该地区具有构造活动强烈、地震活动频繁、地形地貌复杂、次生地质灾害极为发育的特征,近四十年来成为研究热点。许多专家学者基于几何学角度、地震活动特征、运动学角度、动力学角度及断裂地质灾害角度等作为切入点,对则木河断裂带做了详尽的科学研究<sup>[1-11]</sup>。

地质灾害易发性评价是基于基础地质环境条件,以地质灾害的静态因素作为参考,来预测地质灾害在特定范围内发生的概率大小。因此,易发性评价作为危险性评价和风险评价的先决条件,成为地灾调查评价的必要组成部分<sup>[12-14]</sup>。20 世纪 60 年代以来,中外专家学者针对不同地质环境条件,基于各种研究方法、模型对地质灾害易发性评价研究,评价方法也从一开始的定性描述,到半定性半定量,再到定量描述,主要常用方法有信息量法、层次分析法、确定系数法、逻辑回归分析法、证据权法、神经网络法和随机森林模型等<sup>[15-28]</sup>。在对地灾易发性评价的过程中,通常单一的模型方法都会有各种各样的优缺点,很难满足评价所需的精度,因此研究者通过对不同的模型比较以及将不同的模型进行组合,选择合适且精度较高的评价方法或模型,最后得出理想的易发性评价结果<sup>[29-33]</sup>。

截至目前为止,尚未有专家学者对则木河断裂带区域开展地质灾害易发性评价,该区域地质灾害的主控因素、发育规律研究。并且,基于确定性系数法与信息量法,耦合得到加权信息量模型,基于 ArcGIS 软件平台,选择海拔高程坡向、坡度距断层距离、距水系距离、距道路距离、工程地质岩组共 7 个因子,进行易发性评价,得出易发性评价结果,给出防灾减灾建议。

## 1 研究区概况

研究区处于川西地区,凉山州普格县。东西最大距离 21.5 km,南北最大距离 49.9 km,省道 S212 贯穿断裂带区域,交通便利。

普格县内地貌按成因可分为两大类,分别是堆积河谷平原及侵蚀山间盆地、侵蚀剥蚀构造中高山地。研究区内大凉山分支中梁山与螺髻山东西对峙。气候早雨季节分明,受控于印度北部干燥大陆性气团和西南季风。主要降水形式多为雨雪,多年平均降水量 1 176 mm,其中荞窝镇附近年均降雨量为 1 550 mm,最大可达到 1 946.7 mm,是全县暴雨中心。则木河断裂

带穿过研究区内,发育有次级断层大箐断层和扯扯街断层。研究区水系由于构造活动的影响,则木河展布与研究区构造形迹相似,自北向南穿过普格县域,次级支流及溪沟也多与构造线方向垂直分布。区内地层从震旦系到第四系除石炭系部分与泥盆系上统部分缺失外,其余各系均有出露,出露最广是侏罗系和白垩系,火山岩局部出露,新近系普格达组零星分布(图 1)。

## 2 地质灾害发育规律

研究区总面积 671.6 km<sup>2</sup>,通过地质灾害详查、遥感解译等调查方法,查明并掌握区域内地质灾害的发育特征,运用 ArcGIS 数据以及工具统计得到则木河断裂带(普格段)的地质灾害发育分布规律。研究区发育有滑坡 105 处、泥石流 38 处,共计 143 处地质灾害,每百平方公里灾害密度 21.29 处。其中,滑坡、泥石流分别占总量的 73.43%、26.57%,可见滑坡是研究区内主要地质灾害,泥石流次之,无崩塌灾害发育。对研究区灾害规模进行统计(表 1),其中特大型、大型、中型、小型分别有 0 处、6 处、39 处、98 处,主要为中小型灾害,大型次之,无特大型灾害发育。

表 1 则木河断裂带(普格段)地质灾害规模统计表  
Table 1 Statistical table of geological disaster scale of Zemuhe fault zone (Puge section)

规模	特大型/处	大型/处	中型/处	小型/处	合计/处
滑坡	0	6	19	80	105
泥石流	0	0	20	18	38
合计	0	6	39	98	143

### 2.1 断层距离效应

由图 2 可知,地质灾害呈带状分布于则木河断裂带内,绝大部分分布在 2 km 范围内,将区域内地质灾害与距断层距离进行统计分析(表 2),距则木河断层 2 km 范围内分布有 94.4% 的灾害点,距则木河断层 1 km 的范围内分布有 82.5% 的灾害点。由地灾点与距断层距离统计关系图(图 2),地灾以断裂带为中心,分布密度随距离急剧下降。

### 2.2 地层岩性效应

研究区地层岩性分布存在明显差异。断裂带断陷区地层岩性主要为半成岩松散土层,东部地层岩性主要为侏罗系红砂泥岩,西部地层岩性主要为碳酸盐岩和三叠系中硬岩。根据地层与地质灾害的分布关系(图 3),地质灾害主要分布在第四系和三叠系白果湾群、侏罗系益门组和侏罗系新村组,约占总灾害的 78.3%,密度为 0.2 ~ 1.6 处/km<sup>2</sup>,特别是益门组 1.6 处/km<sup>2</sup>。

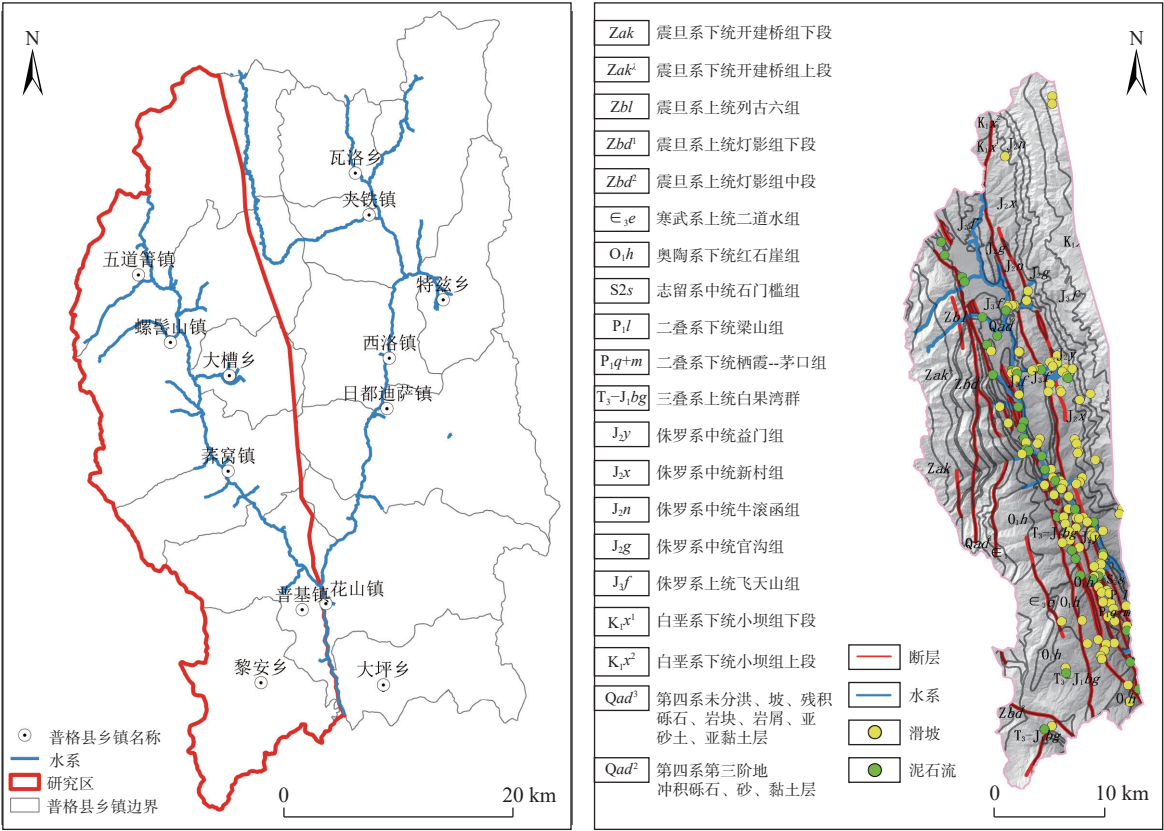


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of study area

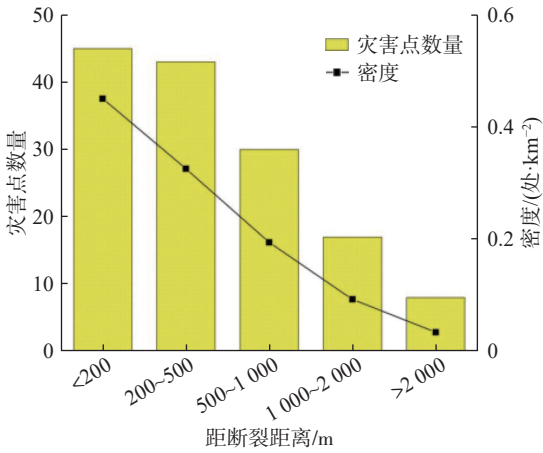


图 2 断层距离与地质灾害关系

Fig. 2 Relationship between fault distance and geological hazards

表 2 灾害点分布与距断层距离的关系

Table 2 Relationship between distribution of disaster points and fault distance

距断裂距离/m	灾害点数量/处	面积/km <sup>2</sup>	密度/(处·km <sup>-2</sup> )
<200	45	83.717 888 28	0.537 519 53
200 ~ 500	43	110.714 287 1	0.388 387 092
500 ~ 1 000	30	129.360 306 5	0.231 910 397
1 000 ~ 2 000	17	153.157 223 2	0.110 997 05
>2 000	8	194.650 294 9	0.041 099 347

这些地层主要分布在断层两侧,构造挤压,岩层破碎。滑坡主要分布在红层和软岩土层中,与地层岩性有关。中硬岩海拔高、坡度陡,地震反应强烈,软岩遇水易软化,强度低。易发生崩滑,给山洪、泥石流的形成提供了大量物源,尤其是新近沉积的土层,流域小,纵坡大,岩土体松散,滑坡坡面侵蚀严重,造成许多小型泥石流。

基于区域岩层强度,将其划分为四类:松散岩土、

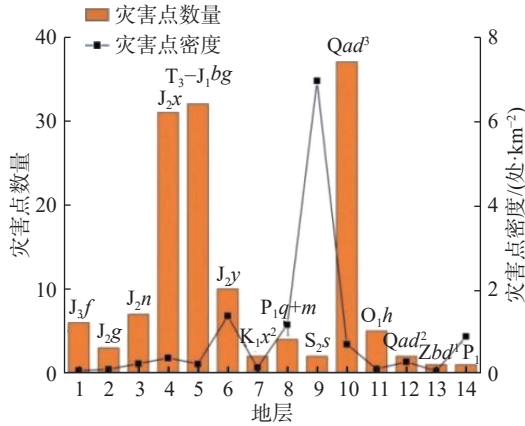


图 3 地层与地灾分布统计关系

Fig. 3 Statistical relationship between strata and geological disaster distribution



碎屑岩、碳酸盐岩与岩浆岩。基于灾害点和地层岩性的统计分析结果(表 3),可以看出,地质灾害在所有岩性中均有分布,其中在松散岩土中发育最多,密度为 0.64 处/km<sup>2</sup>,其次为砂质泥岩、砂质页岩等碎屑岩,密度约为 0.18 处/km<sup>2</sup>,在碳酸盐岩和岩浆岩中发育最少。

表 3 灾害点分布与岩类的关系

Table 3 Relationship between distribution of disaster points and rocks			
岩类	灾害点数量/处	面积/km <sup>2</sup>	密度/(处·km <sup>-2</sup> )
松散岩土类	37	57.258 076 12	0.646 197 052
碎屑岩类	101	561.662 481 3	0.179 823 298
碳酸盐岩	4	51.488 662 47	0.077 687 005
岩浆岩类	1	1.190 780 142	0.839 785 587

2.3 高程与坡度效应

利用 GIS 软件统计研究区泥石流、滑坡的高程分布(图 4)。地质灾害主要分布在海拔 1 000~2 400 m。地质灾害随着海拔的升高而减弱。海拔 1 000~1 500 m 的区域仅占该区域的 7.04%,但地质灾害数量为 58 起,密度高达 1.22 处/km<sup>2</sup>,海拔 1 500~1 800 m 和 1 800~2 100 m 的灾害密度分别为 0.55 处/km<sup>2</sup>和 0.34 处/km<sup>2</sup>(表 4)。调查发现,研究区域的人口主要分布在海拔 2 400 m 以下。这个地区是河谷的中下游。山谷形状通常由 V 形转变为 U 形。支流与干道的交汇区域、岩体与沉积层的边界过渡带、断裂带的分布高程范围、地震波在不同地层、边坡形态和构造中的影响程度不同,重力场和应力场叠加响应的影响因素很多。

边坡坡度为崩塌和滑坡灾害的发展提供了良好的自由空间条件。根据研究区崩塌滑坡发育的边坡统计(图 5、表 5),地质灾害主要分布在 0°~40°,约占总灾

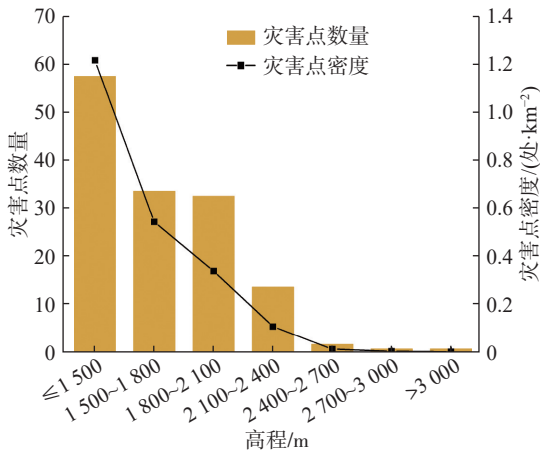


图 4 高程与地灾分布关系

Fig. 4 Relationship between elevation and geological disaster distribution

表 4 灾害点分布与高程的关系

Table 4 Relationship between disaster point distribution and elevation

高程/m	灾害点数量/处	面积/km <sup>2</sup>	密度/(处·km <sup>-2</sup> )
≤1 500	58	47.296 278 74	1.226 312 123
1 500~1 800	34	61.812 730 55	0.550 048 505
1 800~2 100	33	95.517 997 26	0.345 484 631
2 100~2 400	14	123.161 320 9	0.113 672 051
2 400~2 700	2	106.069 374 2	0.018 855 584
2 700~3 000	1	102.444 593	0.009 761 374
>3 000	1	135.297 705 3	0.007 391 108

害的 99%,地质灾害密度随边坡坡度的增大而减小。调查现场发现,影响地质灾害发展的主要因素是地震波放大效应的差异:①凸坡>线性坡>凹坡,地形由缓变陡或由陡变缓的拐点的 PAG 响应最大<sup>[34]</sup>;②随着坡度的增加,加速度、位移和剪应力增加,稳定性急剧下降;③条带状或孤立的多面自由面边坡没有阻塞效应,稳定性差。

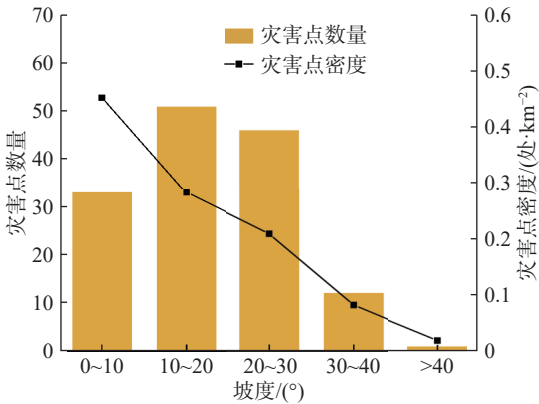


图 5 坡度与地灾分布关系

Fig. 5 Relationship between slope and disaster distribution

表 5 灾害点分布与坡度的关系

Table 5 Relationship between disaster point distribution and slope

坡度/(°)	灾害点数量/处	面积/km <sup>2</sup>	密度/(处·km <sup>-2</sup> )
0~10	33	72.821 424 22	0.453 163 342
10~20	51	180.405 959 6	0.282 695 761
20~30	46	220.861 197 8	0.208 275 607
30~40	12	146.325 892 3	0.082 008 726
>40	1	51.185 526 12	0.019 536 773

3 地质灾害易发性评价

3.1 评价模型

3.1.1 信息量法

信息量模型是对特定评价单元中某一因素作用下

的地灾发生频率和区域内地灾发生频率进行比较来实现的,反映出特定地质环境下最易发生灾害的因素及其细分的组合<sup>[35]</sup>。特定状态下某一因素对应的地质灾害信息量计算公式如下:

$$I_i = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (1)$$

式中:  $I_i$ ——因素  $i$  区间(状态)下地质灾害发生的信息量;

$N_i$ ——因素  $i$  区间(状态)下的地质灾害点个数;

$N$ ——已知地质灾害点总数;

$S_i$ ——因素  $i$  区间(状态)分布的栅格面积;

$S$ ——栅格总面积。

当  $I_i > 0$  时,因素  $i$  区间(状态)下地质灾害发生倾向的信息量越大,越有利于地质灾害发生;当  $I_i < 0$  时,因素  $i$  区间(状态)条件下,不利于地质灾害发生;当  $I_i = 0$  时,因素  $i$  区间(状态)不提供有关地质灾害是否发生的任何信息,可排除其作为预测因子。

### 3.1.2 确定性系数法

确定性分析法即 Shortliffe 等<sup>[36]</sup>提出,经过 Hecker-man<sup>[37]</sup>优化,常常应用在因子敏感性的分析中,也经常作为判断因子权重的方法,进而得到各因子对地质灾害的影响大小<sup>[38]</sup>。基本假设条件为:可以根据易发生地质灾害确定环境因素数据库,通过对两者之间的统计关系进行分析,确定地质灾害的易发程度,计算公式如下:

$$CF = \begin{cases} \frac{PPa - PP_s}{PPa(1 - PP_s)}, & PPa \geq PP_s \\ \frac{PPa - PP_s}{PPa(1 - PPa)}, & PPa < PP_s \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $CF$ ——地灾发生的确定性系数值;

$PPa$ ——评价因子数据的灾害点个数与该区间内数据面积的比值;

$PP_s$ ——整个区内地质灾害点总个数与区内总面积的比值。

$CF$  值大小范围为  $[-1, 1]$ , 正负值表示地灾发生的确定性增大或减小,若  $CF$  值越接近于 0,则无法判断其确定性。

权重计算公式为:

$$W_i = CF_{(i, \max)} - CF_{(i, \min)} \quad (3)$$

式中:  $CF_{(i, \max)}$ ——因子  $i$  对地质灾害发生确定性系数最大值;

$CF_{(i, \min)}$ ——确定性系数最小值。

### 3.1.3 加权信息量模型

信息量模型与评价因子权重之间相乘,构成加权信

息量模型,公式为:

$$I_i = W_i \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (4)$$

通过信息量模型和确定系数法分别计算得出各评价因子图层的信息量值和客观权重值,两者结合,使得易发性评价结果的准确性与精度有所提升。

## 3.2 评价指标的选取与分析

地质灾害的形成原因复杂多样,同时受多种因素影响。在野外调查的基础上,结合前人研究成果,综合区域地质背景、研究尺度以及数据的可靠性等方面,选取海拔高程、坡度、坡向、距断层距离、距水系距离、距道路距离、工程地质岩组作为评价因子指标(表 6)。

### 3.2.1 高程

地质灾害的分布客观上受到海拔高度的影响。不同海拔范围内松散物体临空条件的差异,不同海拔范围内植被分布类型不同以及不同海拔范围内人类经济建设活动强度的差异,都会影响岩土体的稳定性。

研究区内高程范围为 1 036 ~ 4 247 m,基于 ArcGIS 重分类工具把高程数据分类成 7 个区间进行分析,结果如图 6(a)、图 7(c)所示。统计分析结果表明,在 1 036 ~ 2 400 m 高程范围内,分布有 97.20% 的地灾点,其中在高程 1 036 ~ 1 500 m 范围内分布密度最高;地质灾害在高程 2 400 m 以上区域零星发育。随着高程增大,灾害占比减小,信息量也随之减小。

### 3.2.2 坡向

不同的坡向受到的太阳照射时间与强度都大不相同,因而会使得不同坡向的山坡的水热比规律产生差异,从而影响地质灾害的发生。根据研究区 DEM 数据,使用 ArcGIS 分析工具提取坡向,将坡向分为平面、北、东北、东、东南、南、西南、西和西北 9 类进行统计结果图 6(b)、图 7(b)所示。从统计结果来看,研究区内地质灾害主要集中在东、东北、东南以及南和西南方向,共计 111 处,占总灾害的 77.62%。

### 3.2.3 坡度

在一定程度上,坡度控制着坡体上松散岩土堆积厚度和应力分布。坡度是滑坡泥石流等所需物源的形成的基础;为灾害运动提供能量;对地表水径流、地下水渗流产生影响,降低了边坡稳定性。

研究区坡度分布在  $0^\circ \sim 78^\circ$ ,基于 ArcGIS 软件重分类工具把坡度分类为 5 级,统计分析结果如图 6(c)、图 7(c)所示。在坡度  $0^\circ \sim 30^\circ$  之间,分布有 90.90% 的灾害。随着坡度的增加,信息量随之减小,灾害占比和面积占比皆呈现先升后降的趋势。

表 6 评价因子分级信息量值  
Table 6 Evaluation factor classification information value

评价因子	分级	$N_i$	$S_i$	信息量
高程/m	≤1 500	58	166 506	1.750 829 687
	1 500 ~ 1 800	34	217 611	0.949 069 48
	1 800 ~ 2 100	33	336 270	0.484 011 174
	2 100 ~ 2 400	14	433 588	-0.627 619 424
	2 400 ~ 2 700	2	373 416	-2.424 127 878
	2 700 ~ 3 000	1	360 655	-3.082 503 802
坡度/(°)	>3 000	1	476 314	-3.360 659 28
	0 ~ 10	33	255 445	0.755 315 656
	10 ~ 20	51	632 833	0.283 434 285
	20 ~ 30	46	774 743	-0.022 074 748
	30 ~ 40	12	513 286	-0.954 111 328
	>40	1	179 550	-2.388 638 504
坡向	平地	1	1 517	2.385 080 516
	北	8	271 199	-0.721 596 11
	东北	24	351 885	0.116 564 629
	东	26	463 075	-0.077 977 273
	东南	25	360 163	0.134 134 335
	南	18	259 672	0.132 767 678
工程地质岩组	西南	18	214 302	0.324 800 739
	西	14	200 257	0.141 271 005
	西北	9	233 787	-0.455 370 651
	松散岩类	37	210 750	1.108 369 157
	碎屑岩类	101	2 067 259	-0.170 734 496
	碳酸盐岩类	4	189 510	-1.010 023 591
距断层距离/m	岩浆岩类	1	4 393	1.368 111 476
	0 ~ 200	45	294 975	1.862 124 16
	200 ~ 400	31	272 326	1.569 339 604
	400 ~ 600	24	236 142	1.455 972 789
	600 ~ 800	11	202 457	0.829 720 032
	800 ~ 1 000	7	176 491	0.514 992 543
距水系距离/m	1 000 ~ 1 200	8	161 212	0.739 073 55
	1 200 ~ 1 400	1	154 822	-1.299 923 793
	1 400 ~ 1 600	3	139 739	-0.098 811 831
	1 600 ~ 1 800	4	129 360	0.266 047 423
	1 800 ~ 2000	1	121 499	-1.057 553 755
	>2000	8	4 145 167	-2.507 904 537
距道路距离/m	0 ~ 300	54	190 197	2.660 820 212
	300 ~ 600	25	179 240	1.950 046 678
	600 ~ 900	6	168 052	0.587 382 557
	900 ~ 1 200	11	156 140	1.267 038 775
	>1 200	47	6 512 889	-1.011 494 271
	0 ~ 300	74	594 601	2.421 824 195
距断层距离/m	300 ~ 600	20	475 861	1.336 256 172
	600 ~ 900	14	427 658	1.086 383 213
	900 ~ 1 200	6	401 098	0.303 203 376
	>1 200	29	11 046 163	-1.436 892 883

3.2.4 距断层距离

研究区断层多,区域构造活动活跃。岩土体破碎,

致使抗剪强度下降,有利于灾害发育。以断层线为中心,向外缓冲 11 个等级,统计结果如图 6(d)、图 7(d)所示。

地质灾害主要发生在距构造 0 ~ 1 200 m 区段,灾害占比 88.11%,且呈现距断层距离越远,地质灾害发生越少的趋势。信息量整体上随着距断层距离的增加而减小。

3.2.5 距水系距离

河流水系的侵蚀作用是导致地灾发生的诱因之一。河流的侧向侵蚀作用致使边坡坡脚处应力分布集中,前缘失稳,边坡失稳;下蚀作用致使边坡岩土体风化强烈以及势能增大,有利于地质灾害的发育。

基于 ArcGIS 软件缓冲区工具以河流为中心向外缓冲,分为 5 个等级,统计分析结果如图 6(e)、图 7(e)所示。地质灾害整体上大致具有距水系河流越远,地质灾害的发生概率越低,信息量值越小的特点。在 900 ~ 1 200 m 区段,由于面积占比较小,导致信息量较大。距河流 600 m 以内,灾害占比 55.24%,是地灾高发区。

3.2.6 距道路距离

道路建设作为人类重要工程建设活动之一,在道路建设施工中,开挖公路边坡、填方堆积弃渣等,很容易产生许多不稳定或欠稳定边坡,直接或间接导致滑坡灾害发生。

道路向外缓冲 5 级,统计结果如图 6(f)、图 7(f)所示。离公路越近,灾害越多,信息量也越大。公路 300 m 范围内地质灾害发生率高,占 51.74%,信息量高达 2.421 8。

3.2.7 工程地质岩组

不同地质岩组往往具有不同的岩体结构,其岩体硬度和强度也都大不相同,其拉伸和压缩性质也不同,因此发育的灾害的类型、规模也不同。根据出露地层岩体性质以及岩性组合特征,将其划分为四类,分别为松散岩土、碎屑岩、碳酸盐岩和岩浆岩。

基于 ArcGIS 软件对该因子进行分析,分析结果如图 6(g)、图 7(g)所示。灾害点在碎屑岩中分布最多,但由于碎屑岩面积也是最大,所以不是信息量最大的工程地质岩组;虽然仅有 37 处地质灾害分布在松散岩土层中,但由于面积仅占研究区的 8.54%,所以该工程地质岩组信息量较高。

3.3 评价因子权重

评价因子权重是由各因子的确定系数最大值减去最小值得到,结果如表 7 所示。从表 7 得知,研究区高程、距断层距离影响地质灾害最大,因子权重为 1.792、

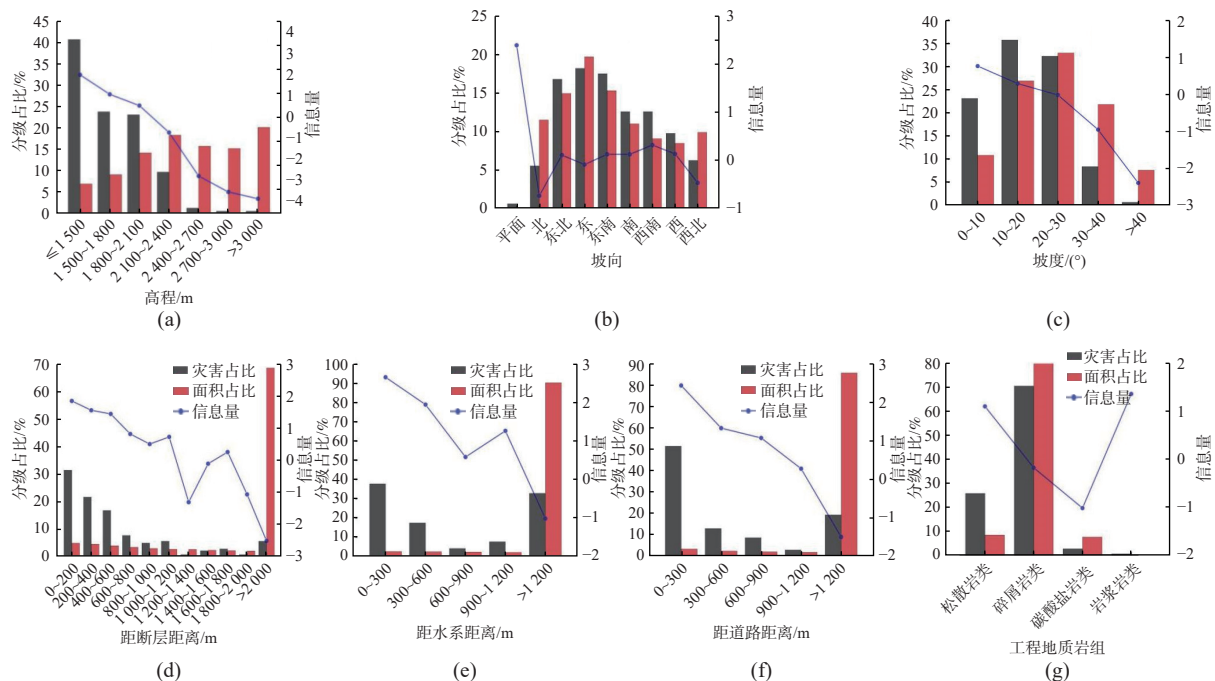


图6 各因子灾害占比、面积占比、信息量相关性统计

Fig. 6 Correlation statistics of disaster proportion, area proportion and information volume of each factor

1.763, 然后是距道路距离、距水系距离, 权重为 1.674、1.566, 最后是坡度、坡向和工程地质岩组三个因子的权重较低, 分别为 1.438、1.422、1.381。

### 3.4 评价结果与分析

在单因素加权信息层的基础上, 利用 spatial analyst 下的 rastercalculator 工具对每一层进行叠加, 得到易发性评价图, 然后利用自然间断法将其重新划分为 4 类, 即极高、高、中和低易发区。基于 ArcGIS 软件, 将灾害点分布与易发性评价分区结果叠加在一起, 进而统计得到各易发等级下灾害点个数、灾害点占比以及灾害点密度、易发区面积以及面积占比等, 如图 8 和表 8 所示。

根据分析结果可知, 极高易发区 46.75 km<sup>2</sup>, 面积占比为 6.96%。该区主要分布在则木河及其支流两岸。该区域主要为碎屑岩和松散岩土, 人口稠密, 人类工程活动频繁, 省道 S212 沿河修建, 开挖边坡, 河流侵蚀强烈, 易引发灾害。区内分布有 67 处地质灾害, 占比 46.85%, 密度 143.31/100 km<sup>2</sup>。

高易发区 123.78 km<sup>2</sup>, 面积占比 18.43%。该区域在极高易发区周围呈团状分布; 主要为碎屑岩和松散岩土, 少部分碳酸盐岩, 岩体较为破碎; 人口密度较大, 工程活动较为活跃; 水系强烈侵蚀, 也易引发灾害。共有 51 处地质灾害分布在该区内, 占全部地质灾害的 35.66%, 灾害密度为 41.20 处/100 km<sup>2</sup>。极高和高易发

区面积占整个研究区的 25.39%, 但灾害数量却占整个研究区的 82.51%, 密度合计高达 184.51 处/100 km<sup>2</sup>。

中易发区 215.73 km<sup>2</sup>, 面积占比 32.12%。该区主要为碎屑岩和部分碳酸盐岩; 地形逐渐陡峭, 沟谷密集; 河流冲刷作用逐渐减弱; 受公路建设开挖边坡影响减小。区内分布有 22 处地质灾害, 占比 15.38%, 密度为 10.20 处/100 km<sup>2</sup>。

低易发区 285.34 km<sup>2</sup>, 面积占比 42.49%。该区主要分布在黎安乡西部、西南部, 荞窝镇-大槽乡-螺髻山镇-五道箐镇一线的东、西部, 以及普基镇西北部地区。该区域主要为碎屑岩和部分碳酸盐岩, 无松散岩土岩组, 植被覆盖度高, 坡陡、高程较大, 不适宜人类居住活动; 距离水系、道路和断层较远, 影响较弱。区内分布有 3 处地质灾害, 占比为 2.10%, 密度为 1.05 处/100 km<sup>2</sup> (图 7)。

## 4 结论

以则木河断裂带(普格段)为研究对象, 分析研究区的地质灾害控制效应以及发育规律, 运用确定性系数模型与信息量模型耦合的加权信息量模型, 选择海拔高程、距断层距离、距道路距离、距水系距离、坡向、坡度、工程地质岩组共 7 个评价因子对研究区进行地质灾害易发性评价, 给出防灾减灾建议, 得出结论如下。

(1) 研究区共发育有 143 处地质灾害, 密度 21.29 处/



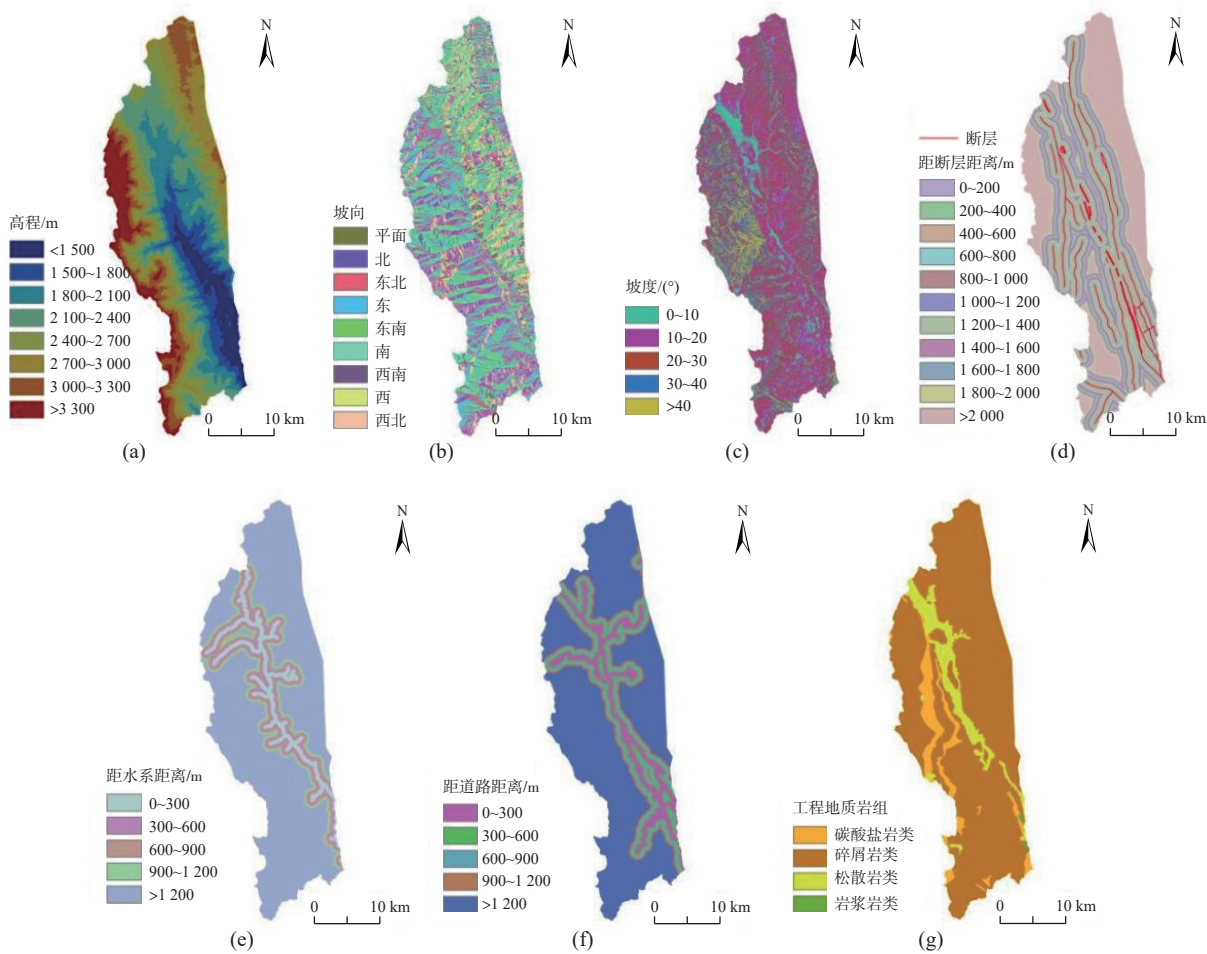


图 7 评价因子分级图

Fig. 7 Grading chart of evaluation factors

表 7 评价因子权重

Table 7 Evaluation factor weight

评价因子	$CF_{\max}$	$CF_{\min}$	权重
高程	0.826	-0.965	1.792
坡度	0.530	-0.908	1.438
工程地质岩组	0.745	-0.636	1.381
距断层距离	0.845	-0.919	1.763
距水系距离	0.930	-0.636	1.566
距道路距离	0.911	-0.762	1.674
坡向	0.908	-0.514	1.422

100 km<sup>2</sup>。其中,有 105 处滑坡、38 处泥石流,规模大小主要为中小型。灾害点呈带状分布于断裂带内,以断裂为中心,随距离变远密度急剧下降。灾害分布具有地层倾向性,主要在第四系、三叠系白果湾群、益门组、新村组四个地层中分布,占地灾总量的 78.3%。微地貌上,灾害主要分布于坡度 0°~40°,高程 1 000~2 400 m。

(2)通过各因子的分级信息量计算分析,表明地质灾害在高程≤1 500 m、距构造距离 0~200 m、距道路

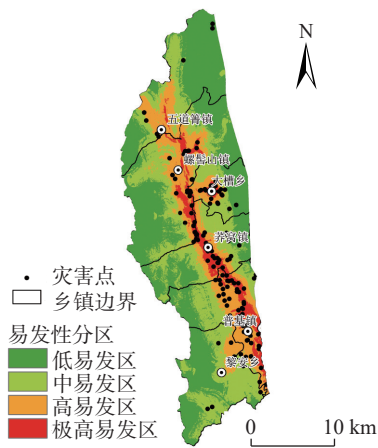


图 8 地质灾害易发性分区

Fig. 8 Zoning of geological hazard susceptibility

距离 0~300 m、距水系距离 0~300 m、坡度 0°~10°、西南向和松散岩土的区域信息量最大。对各因子确定权重,从大到小排序依次为高程、距断层距离、距道路距离、距水系距离、坡度、坡向、工程地质岩组,权

表 8 研究区地质灾害易发分区统计表  
Table 8 Statistical table of geological hazard prone zones in the study area

易发性分区	面积/km <sup>2</sup>	面积占比/%	灾害点/处	灾害占比/%	每百平方公里灾害点密度/处	灾害占比与面积占比比值
低易发区	285.34	42.49	3	2.10	1.05	0.05
中易发区	215.73	32.12	22	15.38	10.20	0.48
高易发区	123.78	18.43	51	35.66	41.20	1.94
极高易发区	46.75	6.96	67	46.85	143.31	6.73
合计	671.60	100.00	143	100.00	—	—

重大小分别为 1.792、1.763、1.674、1.566、1.438、1.422、1.381。

(3)易发性评价结果分成 4 个易发性分区,其中极高易发区、高易发区、中易发区和低易发区的面积分别为 46.75 km<sup>2</sup>、123.78 km<sup>2</sup>、215.73 km<sup>2</sup>、285.34 km<sup>2</sup>,面积占比分别为 6.96%、18.43%、32.12%、42.49%。

参考文献 (References) :

[1] 则木河活断裂填图组. 则木河活动断裂带 1:5 万地质填图及综合研究 [J]. 四川地震, 2000(增刊 1): 1-4. [Working group for geologic mapping on Zemuhe fault. Geologic mapping and comprehensive analysis on the active faults of Zemuhe [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2000(Sup 1): 1-4. (in Chinese with English abstract)]

[2] REN J W, PING L. Earthquake-caused landforms and paleoseismic study on the northern segment of the Zemuhe fault [J]. Seismology & Geology, 1989.

[3] REN Z K, LIN A M. Deformation characteristics of co-seismic surface ruptures produced by the 1850 M 7.5 Xichang earthquake on the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 38(1/2): 1-13.

[4] 任治坤, 田勤俭, 张军龙. 后差分 GPS 测量则木河断裂地震微地貌特征 [J]. 地震, 2007, 27(3): 97-104. [REN Zhikun, TIAN Qinqian, ZHANG Junlong. Micro geomorphology of Zemuhe Fault surveyed by virtue deferential GPS [J]. Earthquake, 2007, 27(3): 97-104. (in Chinese with English abstract)]

[5] 杜平山. 则木河断裂带的演化历史及变形机制 [J]. 四川地震, 2000(增刊 1): 65-79. [DU Pingshan. Evolution histories and deformation mechanism about active fault of Zemuhe [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2000(Sup 1): 65-79. (in Chinese with English abstract)]

[6] 闻学泽. 则木河断裂的第四纪构造活动模式 [J]. 地震研究, 1983, 6(1): 41-50. [WEN Xueze. Model of active tectonic of the quaternary period of Zemu river fault [J]. Journal of Seismological Research, 1983, 6(1): 41-50. (in Chinese with English abstract)]

[7] 唐荣昌, 黄祖智, 伍先国, 等. 则木河断裂全新世以来的新活动与地震 [J]. 中国地震, 1986, 2(4): 84-90. [TANG Rongchang, HUANG Zuzhi, WU Xianguo, et al. The new activities and earthquakes of the Zemuhe fault since the Holocene [J]. Earthquake Research in China, 1986, 2(4): 84-90. (in Chinese with English abstract)]

[8] 冯元保, 杜平山. 1850 年西昌地震孕育和发生的地质构造条件 [J]. 四川地震, 2000(增刊 1): 97-101. [FENG Yuanbao, DU Pingshan. Geologic tectonic and earthquake preparation conditions about 1850 Xuchuan earthquake [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2000(Sup 1): 97-101. (in Chinese with English abstract)]

[9] 王虎, 冉勇康, 李彦宝, 等. 则木河断裂上古地震破裂与小型三角状拉分盆地演化 [J]. 中国科学(地球科学), 2013, 43(7): 1106-1114. [WANG Hu, RAN Yongkang, LI Yanbao, et al. Upper paleoseismic rupture of Zemuhe fault and evolution of small triangular pull apart basin [J]. Scientia Sinica (Terra), 2013, 43(7): 1106-1114. (in Chinese with English abstract)]

[10] 郭乾. 则木河断裂带中段典型古地震滑坡动力学特征研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2014. [GUO Qian. Research on dynamical characteristics of historical seismic landslide in the middle of Zemuhe fault zone [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]

[11] 曹文正. 则木河断裂带西昌—普格段重大古滑坡发育特征及成因机理研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015. [CAO Wenzheng. Research on development characteristics and genetic mechanism of the seismic landslides from Xichang to Puge along Zemuhe fault zone [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)]

[12] 黄润秋, 向喜琼, 巨能攀. 我国区域地质灾害评价的现状 & 问题 [J]. 地质通报, 2004, 23(11): 1078-1082. [HUANG Runqiu, XIANG Xiqiong, JU Nengpan. Assessment of China's regional geohazards: Present situation and problems [J]. Regional Geology of China, 2004, 23(11): 1078-1082. (in Chinese with English abstract)]

[13] GUZZETTI F, REICHENBACH P, CARDINALI M, et al. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale [J]. Geomorphology, 2005, 72(1/2/3/4): 272-299.

- [14] 倪化勇,王德伟,陈绪钰,等.四川雅江县城地质灾害发育特征与稳定性评价[J].*现代地质*,2015,29(2):474-480. [NI Huayong, WANG Dewei, CHEN Xuyu, et al. Formation characteristics and stability assessment of geological hazards in Yajiang City, Sichuan Province [J]. *Geoscience*, 2015, 29(2): 474-480. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 阮沈勇,黄润秋.基于GIS的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J].*成都理工大学学报*,2001,28(1):89-92. [RUAN Shenyong, HUANG Runqiu. Application of gis-based information model on assessment of geological hazards risk [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28(1): 89-92. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 薛强,张茂省,李林.基于斜坡单元与信息量法结合的宝塔区黄土滑坡易发性评价[J].*地质通报*,2015,34(11):2108-2115. [XUE Qiang, ZHANG Maosheng, LI Lin. Loess landslide susceptibility evaluation based on slope unit and information value method in Baota District, Yanan [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(11): 2108-2115. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈朝亮,张文君,钱静,等.基于改进Logistic回归模型在地质灾害评价中的应用[J].*环境科学与技术*,2019,42(4):188-193. [CHEN Chaoliang, ZHANG Wenjun, QIAN Jing, et al. Application of improved logistic regression model in geological hazard evaluation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(4): 188-193. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 赵成,张永军,赵玉红.层次分析法在甘肃省地质灾害易发性评价中的应用[J].*冰川冻土*,2009,31(1):182-188. [ZHAO Cheng, ZHANG Yongjun, ZHAO Yuhong. Application of the hierarchical analytical methods to evaluating geological hazard tendency in Gansu Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 182-188. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 许冲,戴福初,姚鑫,等.基于GIS与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J].*工程地质学报*,2010,18(1):15-26. [XU Chong, DAI Fuchu, YAO Xin, et al. GIS platform and certainty factor analysis method based Wenchuan earthquake-induced landslide susceptibility evaluation [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(1): 15-26. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李益敏,李驭豪,赵志芳.基于确定性系数模型的泸水市泥石流易发性评价[J].*水土保持研究*,2019,26(4):336-342. [LI Yimin, LI Yuhao, ZHAO Zhifang. Assessment on susceptibility of debris flow in Lushui based on the certain factor model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(4): 336-342. (in Chinese with English abstract)]
- [21] SANDRIC I, IONITA C, CHITU Z, et al. Using CUDA to accelerate uncertainty propagation modelling for landslide susceptibility assessment [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 115: 176-186.
- [22] ADITIAN A, KUBOTA T, SHINOHARA Y. Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia [J]. *Geomorphology*, 2018, 318: 101-111.
- [23] 张书豪,吴光.随机森林与GIS的泥石流易发性及可靠性[J].*地球科学*,2019,44(9):3115-3134. [ZHANG Shuhao, WU Guang. Debris flow susceptibility and its reliability based on random forest and GIS [J]. *Earth Science*, 2019, 44(9): 3115-3134. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 黄立鑫,郝君明,李旺平,等.基于RBF神经网络-信息量耦合模型的滑坡易发性评价:以甘肃岷县为例[J].*中国地质灾害与防治学报*,2021,32(6):116-126. [HUANG Lixin, HAO Junming, LI Wangping, et al. Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(6): 116-126. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 刘福臻,王灵,肖东升.机器学习模型在滑坡易发性评价中的应用[J].*中国地质灾害与防治学报*,2021,32(6):98-106. [LIU Fuzhen, WANG Ling, XIAO Dongsheng. Application of machine learning model in landslide susceptibility evaluation [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(6): 98-106. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 周天伦,曾超,范晨,等.基于快速聚类-信息量模型的汶川及周边两县滑坡易发性评价[J].*中国地质灾害与防治学报*,2021,32(5):137-150. [ZHOU Tianlun, ZENG Chao, FAN Chen, et al. Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 137-150. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 方然可,刘艳辉,黄志全.基于机器学习的区域滑坡危险性评价方法综述[J].*中国地质灾害与防治学报*,2021,32(4):1-8. [FANG Ranke, LIU Yanhui, HUANG Zhiqian. A review of the methods of regional landslide hazard assessment based on machine learning [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 1-8. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 郭学飞,王志一,焦润成,等.基于层次分析法的北京市地质环境质量综合评价[J].*中国地质灾害与防治学报*,2021,32(1):70-76. [GUO Xuefei, WANG Zhiyi, JIAO Runcheng, et al. Comprehensive evaluation method of geological environment quality in Beijing based on AHP [J]. *The Chinese*

- Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(1): 70 – 76. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 29 ] 张晓东, 刘湘南, 赵志鹏, 等. 信息量模型、确定性系数模型与逻辑回归模型组合评价地质灾害敏感性的对比研究 [ J ]. 现代地质, 2018, 32(3): 602 – 610. [ ZHANG Xiaodong, LIU Xiangnan, ZHAO Zhipeng, et al. Comparative study of geological hazards susceptibility assessment: Constraints from the information value + logistic regression model and the CF + logistic regression model [ J ]. Geoscience, 2018, 32(3): 602 – 610. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 30 ] 田春山, 刘希林, 汪佳. 基于CF和Logistic回归模型的广东省地质灾害易发性评价 [ J ]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 154 – 161. [ TIAN Chunshan, LIU Xilin, WANG Jia. Geohazard susceptibility assessment based on CF model and Logistic Regression models in Guangdong [ J ]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 154 – 161. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 31 ] 李远远, 梅红波, 任晓杰, 等. 基于确定性系数和支持向量机的地质灾害易发性评价 [ J ]. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1699 – 1709. [ LI Yuanyuan, MEI Hongbo, REN Xiaojie, et al. Geological disaster susceptibility evaluation based on certainty factor and support vector machine [ J ]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(12): 1699 – 1709. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 32 ] 樊芷吟, 苟晓峰, 秦明月, 等. 基于信息量模型与Logistic回归模型耦合的地质灾害易发性评价 [ J ]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 340 – 347. [ FAN Zhiyin, GOU Xiaofeng, QIN Mingyue, et al. Information and logistic regression models based coupling analysis for susceptibility of geological hazards [ J ]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 340 – 347. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 33 ] 何原荣, 傅文杰. 模糊支持向量机在滑坡危险性评价中的应用 [ J ]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 107 – 112. [ HE Yuanrong, FU Wenjie. Application of fuzzy support vector machine to landslide risk assessment [ J ]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(5): 107 – 112. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 34 ] 冯文凯, 黄润秋, 许强. 斜坡震裂变形发育分布规律及危险性分析 [ J ]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(6): 679 – 684. [ FENG Wenkai, HUANG Runqiu, XU Qiang. Analysis of the development, distribution rules and risk of slope shattering deformation [ J ]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010, 37(6): 679 – 684. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 35 ] 殷坤龙, 晏同珍. 汉江河谷旬阳段区域滑坡规律及斜坡不稳定性预测 [ J ]. 地球科学, 1987, 12(6): 631 – 638. [ YIN Kunlong, YAN Tongzhen. Distribution regularity of landslides and prediction of slope instability nearby Xunyang, Han River valley [ J ]. Earth Science, 1987, 12(6): 631 – 638. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 36 ] SHORTLIFFE E H, BUCHANAN B G. A model of inexact reasoning in medicine [ J ]. Mathematical Biosciences, 1975, 23(3/4): 351 – 379.
- [ 37 ] HECKERMAN D. Probabilistic interpretations for MYCIN's certainty factors [ J ]. CoRR, 2013, abs/1304.3419: 167 – 196.
- [ 38 ] 刘艳辉, 刘传正, 唐灿, 等. 基于确定性系数模型的地质灾害多因子权重计算方法 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 92 – 97. [ LIU Yanhui, LIU Chuanzheng, TANG Can, et al. CF-based multi-factor overlay method to determine weights of the factors for geo-hazards [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 92 – 97. (in Chinese with English abstract) ]